

太湖

—— 沉积物污染与修复原理

Lake Taihu:

Principles of Sediment Pollution
and Remediation

范成新 张 路 等/著



科学出版社

www.sciencep.com

45

太湖——沉积物污染与修复原理

范成新 张 路 等 著

附录(III) 目录附录并图

附录出学件,京北一, 著李范新, 张路等, 附录夏湖沉积物污染并图, 附录

附录
附录
附录
附录

X524
F097

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是以太湖为主要对象的湖泊沉积物污染与修复的研究在内容和理论成果上的系统总结。全书共计 8 章,分为三方面内容:第一、二章介绍湖泊沉积物来源、入湖水系和受水区河口湖湾泥沙及其污染物赋存特征与空间输移悬浮效应;第三至五章主要介绍湖泊沉积物中营养物、重金属和持久性有机污染物的分布、形态特征和暴露状态所形成的生物可利用性及构成的环境与生态风险;第六至八章则是针对以营养物为主的湖泊沉积物污染性质,采用底泥疏浚、材料覆盖、盐类投加、植物种植等原位修复方法和模式,所得到的污染控制和修复效应的技术原理。

本书可供从事湖泊水库等水体的环境化学、环境生物、沉积学、环境保护、环境工程、水利、水产和流域管理等方面的科研人员、工程技术人员、管理人员和大专院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

太湖:沉积物污染与修复原理 / 范成新,张路等著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-026180-9

I. 太… II. ①范… ②张… III. 太湖-湖泊沉积物-污染防治 IV. X524

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 220236 号

责任编辑:朱 丽 王国华 / 责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 12 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2009 年 12 月第一次印刷 印张:25 1/4

印数:1—1 500 字数:478 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

Lake Taihu: Principles of Sediment Pollution and Remediation

Fan Chengxin, Zhang Lu et al.



SCIENCE PRESS
Beijing

序

湖泊是具有明显流域界限的自然综合体,从高纬到低纬、从高山到平原,均有其分布。湖泊不具备地带性特征,但是湖泊的形成往往表现出同步性与事件性,而且湖泊一旦开始其生命过程,深受所在流域的地形、气候、植被、土壤、围岩和构造的影响,表现出湖泊多样性特征和明显的区域特色,在一定意义上说,湖泊是圈层相互作用的联结点,是区域环境的镜子。湖泊是流域物质的汇,其演化过程中的物理、化学、生物特征都被湖泊沉积物忠实地记录和保存。虽然湖泊环境系统是流域与湖泊多界面、多介质相互作用的结果,极其复杂和多样,但是,湖泊沉积物沉淀、再悬浮和沉积后过程与机理的精细研究,是深刻揭示和理解湖泊环境过程的重要途径之一,湖泊沉积在湖泊环境研究体系中占有极其重要的地位。

随着工农业的发展、城市化进程的加快和规模的扩大,大量废水和污水直接排放入湖,加之湖泊资源的过度开发利用,湖泊污染日趋严重,水质退化、水生态系统转型、蓝藻水华、黑水团等环境灾害频频发生,不仅直接危及饮水安全与人体健康,而且威胁区域经济社会的可持续发展,湖泊环境问题已成为各级政府与民众高度关注的焦点。以湖泊环境治理与生态修复为目的的研究工作,以前所未有的广度和深度全面开展。湖泊沉积物,作为湖泊无机与有机物质的主要储存库,继“陆相生油”和过去全球变化之后,再一次被推上重要的研究位置,而和以往的研究相比,湖泊沉积被赋予新的研究思路和研究方法,开拓了新的研究领域。

首先,湖泊沉积是湖泊环境系统动态过程的积极参与者,因此,湖泊沉积物赋存信息的提取不再是静态的分析,而是将表层和近表层沉积物与上覆水体、沉积物上生长的植物与活动其上的底栖生物、沉积物内的物质形态(N、P、重金属等的结合态),以及孔隙水的物化性质融为一体。通过实地原位观测、室内栽培与动态模拟试验、高精度的实验分析,综合揭示不同时间尺度和生态类型湖泊沉积物的汇源关系转换的条件、过程特点以及水环境效应,逐步完善和形成受污染沉积物研究较系统的新思路和方法体系。

加强湖泊水-沉积物界面过程与机理研究,深入理解界面过程在变化的湖泊环境系统中的重要作用。浅水湖泊水-沉积物界面极不稳定的特点,决定了湖泊沉积物的内源释放以动态释放为主,其动力过程要比深水湖泊的单一静态释放复杂得多。通过高分辨、高精度的原位观测与采样分析,揭示不同风向、风强条件下再悬浮作用形成的水体层次结构、悬浮物(颗粒物、营养盐)的数量分布及其变化过程,同时通过水槽模拟和再悬浮作用的室内动态模拟试验,获得沉积物再悬浮的临界剪切力及不同扰动强度的悬浮物数量。综合分析发现,再悬浮作用不仅向上覆水

体释放大物质,从而进一步影响水体中微粒界面的营养盐交换与循环,是支撑水体浮游植物生命过程的重要环节,而且再悬浮作用也在一定程度上改变了下覆沉积物和孔隙水的理化条件。因此,再悬浮作用在湖泊环境系统动态变化过程中发挥着关键作用,在一定程度上也拓宽了对湖泊内源负荷认识的视野。

湖泊沉积是湖泊环境系统的组成部分,沉积物污染的程度和水体指标一样也表征了湖泊环境的状况。就沉积物污染来源而言,传统上只考虑流域河道的输入,近年来由于酸雨、大量化肥施用与挥发,大气沉降已成为不可忽视的来源。同时,除了常规的营养物与重金属外,持久性有机污染物日益受到重视与关注,开展了来源、生物富集、食物链传输途径和生态毒性的试验研究,研究范围大大拓展。

受污染湖泊沉积物的修复与新生界面过程研究,促进了沉积物的理论研究与工程工程的结合。当前受污染沉积物的治理中,疏浚是被应用得最广泛的工程措施之一,但是由于生态与环境效果不一,疏浚措施至今仍存在争议。为了消除或减少疏浚本身引起的不良的环境效应,加强了近表层沉积物以及不同疏浚深度情况下内源释放的过程特点的研究与模拟,科学确定疏浚深度;同时,改进疏浚机械的自动化控制水平和绞吸沉积物装置,提高疏浚质量,既可节约大量经费,又可达到生态疏浚的目的。一般在疏浚后的初期,湖泊水环境改善明显,但是疏浚的新生界面随着湖泊悬浮物的沉降,又重新被覆盖,回复内源释放功能,直接影响上覆水水质。这也是疏浚工程遭到质疑的原因。为此,根据不同湖泊或湖区新生界面回复内源释放过程的跟踪监测资料,以及相关的模拟结果,归纳新生界面复活类型与规律,不失时机地种植沉水植物,巩固疏浚的水质改善效果,并使之能够持续,实现工程-生态综合治理污染沉积物的目标。

学术界高度关注污染湖泊沉积物的治理,提出覆盖、固化、曝气等多种技术和方法,对于“牵一发而动全身”的复杂湖泊生态与环境系统,这些技术的后效还存在很大的不确定性。单一技术的使用难以收到事半功倍的效果,如何构造多种技术组合的治理模式尚需时日。在湖泊环境污染极其严重的形势下,湖泊沉积污染与修复这一新兴领域,无论在理论体系还是在技术方法层面,尚需付出极大努力,以期在大型浅水湖泊沉积学方面作出中国科学家的贡献。

王东民

2009年11月

前 言

沉积物是湖泊生态与环境系统中最重要的一部分，是水圈、岩石圈和生物圈交互作用的活跃圈层，既对外界水气、生物物质具有容纳、储存能力，又是表层及近表层物质积极转化与交替的场所，表现出特有的环境和生态效应，因而是湖泊生态系统中亟待研究的领域。自然湖泊的沉积物一般并非有与生俱有污染性，相反却是湖泊集水域内一切来源物质的汇，为净化水体和消除污染物起着积极的调节作用。由于人类活动的影响，与沉积物直接接触的受污染水体因不断接纳超过其净化能力的污染物质，并通过吸附、包夹及物理、化学和生物的沉积使得上层沉积物具有污染特征。作为湖泊系统中固体介质的代表，沉积物积极参与水体中各类物化反应和生物作用，对水环境和水生生物产生影响。储存于沉积物中不同种类和数量的污染物，通过在环境中的暴露、沉积物-水界面的释放等过程，将赋予沉积物对湖泊水环境和生态系统形成威胁的潜在能力。

底泥是湖泊中与水体接触面积最大的一类介质，对水体质量具有较强的影响力，因此控制底泥污染，以及对污染底泥进行修复，是改善湖泊水体水质、促使生态系统良性化的最为重要的途径之一。由于湖泊沉积物分布的时空差异及受环境因素影响程度表现出复杂性和多变性，污染物在沉积物界面表层及近表层的行为和效应呈现出纷繁的动态过程，因此介入人工控制和原位修复，来抑制污染物质在沉积物为主体的介质中和界面上的污染行为非常必要。鉴于沉积物对湖泊生态系统的重要性以及人为措施对污染沉积物修复的有效性，系统深入探讨湖泊沉积物污染机理和修复原理，是亟待加强的新兴分支方向，对指导污染湖泊的治理有着非常重要的意义。

本书是作者集十多年的相关研究成果撰写而成。先后受国家高技术研究发展计划(863)太湖水专项(2002AA601013)、国家自然科学基金重点和面上项目(No. 40730528, No. 40171083, No. 20577053)、江苏省科技项目(BS2007161, BK99204-2, BS98018)、中国科学院知识创新项目(KZCX1-SW-12, KZCX3-SW-348),以及水利部太湖流域管理局和江苏省水利部门等相关课题的资助。作者在系统总结第一手资料的基础上进行了理论上的提升。以太湖为例，从水系尺度进行了湖泊沉积物来源、污染物在沉积物中垂向分布特征及其形成原因分析，评估和阐述了湖泊污染物在沉积物中的暴露风险、生物可利用及其环境效应；从技术原理角度出发，分析了采用底泥疏浚、材料覆盖、水下充氧、植物种植等不同单一或组合式原位修复手段的环境效应，总结了实现其效果的途径和环境条件，以及改善污染沉积物的长、短期效应和修复模式。全书内容较为丰富，注重系统性、科学性和实用性，为控

制湖泊沉积物污染提供了理论指导和方案决策依据。

全书共分八章。第一章由范成新、张路、王兆德、钟继承、尹洪斌撰写；第二章由范成新、张路、尤本胜、郑超海、王同成撰写；第三章由张路、范成新、尹洪斌撰写；第四章由尹洪斌、范成新、姜晓辉撰写；第五章由张路、赵中华、范成新撰写；第六章由钟继承、王建军、范成新、吴朝明撰写；第七章由包先明、范成新、陈开宁撰写；第八章由范成新、包先明、李宝、韩红娟撰写。在本书出版之际，作者诚挚地感谢张之剑、史学正、胡维平、季江、杨龙元、胡春华等同志为完成本书中有关章节的数据获取提供了帮助。感谢王苏民先生为本书主要章节进行认真修改并提出意见。感谢张雷、申秋实和卢信博士对部分章节进行校对。本书所涉研究项目主要受助于科学技术部、国家自然科学基金委员会、江苏省科学技术厅、水利部太湖流域管理局、江苏省水利厅和无锡市水利局等部门，并主要依托湖泊与环境国家重点实验室和中国科学院太湖湖泊生态系统研究站的实验条件，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，诚恳地请有关专家和广大读者不吝指教，并能给出批评和建议。

作 者

2009年10月于南京

目 录

序

前言

第一章 入湖水系沉积物中污染物赋存及风险	(1)
第一节 湖泊沉积物来源及入湖水系污染	(2)
一、沉积物来源及河流悬移质输入	(2)
二、入湖水系的复杂污染环境特征	(4)
第二节 入湖水系底泥营养物赋存及释放风险	(11)
一、水系不同功能水体底泥营养物赋存特征	(11)
二、功能水体和水系沉积物磷素流失风险	(20)
三、出入湖水系沉积物中营养物赋存及释放	(24)
第三节 入湖水系沉积物重金属污染风险	(34)
一、典型入湖水系沉积物重金属污染	(34)
二、入湖水系沉积物重金属污染原因及影响因素	(39)
三、城市入湖水体沉积物重金属污染特征	(42)
第四节 入湖水系沉积物中持久性有机污染物分布	(45)
一、入湖水系持久性有机污染物蓄积特征	(45)
二、入湖水系沉积物中的多环芳烃优先污染物	(52)
三、入湖水系持久性有机污染物来源及特征指数	(57)
参考文献	(59)
第二章 河口湖湾泥沙沉积及悬移质环境行为	(61)
第一节 湖底地形与现代沉积分布	(61)
一、湖底地形和湖岸特征	(61)
二、太湖及其河口湖湾沉积物分布	(62)
第二节 湖泊沉积物及间隙水主要物理性质	(65)
一、沉积物粒度分布特征	(65)
二、沉积物 E_h 分布特征	(68)
三、沉积物含水率分布特征	(69)
第三节 浅水湖泊沉积物再悬浮与沉降特征	(70)
一、沉积物再悬浮的室内模拟及其定量化研究	(70)
二、不同湖区再悬浮与沉降过程的季节变化	(79)
三、水动力再悬浮与絮凝沉降状态中的颗粒物特征	(90)
第四节 扰动过程下湖泊沉积物对营养物的吸附解吸行为	(94)

一、动力扰动下表层沉积物对磷的吸附与解吸	(94)
二、动力扰动下沉积物间隙水与水柱中营养物交换	(97)
第五节 湖湾风浪作用下沉积物磷负荷变化	(103)
一、水动力扰动下水柱物质变化与初级生产力关系	(103)
二、湖湾水动力作用下磷的界面交换	(105)
三、湖湾沉积物磷持留释放与氧化还原特征关系	(108)
参考文献	(109)
第三章 湖泊沉积物营养物赋存及生物可利用性	(112)
第一节 湖泊沉积物中营养物来源及总量赋存	(112)
一、沉积物中营养物的来源	(112)
二、表层沉积物中营养物含量分布	(113)
三、太湖沉积物中营养物垂向分布特征	(115)
第二节 沉积物中营养物多态性和生物可利用性	(124)
一、湖泊沉积物中磷的多态性	(124)
二、沉积物中磷的生物可利用性	(131)
第三节 草藻型湖区间隙水中营养物分布及释放潜力	(134)
一、夏季湖泊间隙水中营养盐分布	(135)
二、冬季湖泊间隙水中营养盐分布	(141)
第四节 草藻型湖区间隙水氮、磷物质扩散	(146)
一、间隙水营养物浓度梯度扩散模型	(146)
二、典型湖区间隙水营养物浓度梯度扩散速率	(148)
参考文献	(150)
第四章 湖泊沉积物重金属累积特征及环境危害性	(154)
第一节 湖泊沉积物中重金属分布特征	(154)
一、表层沉积物重金属分布特征	(154)
二、主要湖区沉积物重金属垂向分布	(164)
第二节 湖泊沉积物间隙水中金属离子分布相关性	(170)
一、间隙水中主要环境条件分布特征	(171)
二、金属离子在间隙水中的含量分布	(173)
第三节 湖泊沉积物重金属指示特征	(175)
一、沉积物可提取金属与 AVS 的空间分布	(175)
二、沉积物 SEM 与 AVS 污染关系	(181)
三、湖泊沉积物重金属生态危害风险	(182)
第四节 湖泊沉积物环境暴露影响下重金属迁移性	(186)
一、污染沉积物在自然暴露环境下的淋溶实验	(186)
二、沉积物重金属迁移对下层土壤含量的影响	(188)
三、酸性湿沉降对沉积物中重金属向土层迁移的驱动	(192)
参考文献	(195)

第五章 湖泊持久性有机污染物生态毒性及暴露风险	(197)
第一节 湖泊沉积物有机氯农药分布及暴露	(197)
一、表层沉积物中有机氯农药空间分布特征	(198)
二、沉积物中有机氯农药垂向分布特征	(202)
三、沉积物有机氯农药季节变化	(204)
第二节 沉积物中持久性有机污染物生态毒性	(206)
一、湖泊沉积物的 Ames 试验	(207)
二、沉积物的其他遗传毒性试验	(209)
第三节 底栖及游泳动物对湖泊有机氯农药生物富集	(210)
一、底栖生物对湖泊水土有机氯农药的富集	(211)
二、游泳动物对湖泊水土有机氯农药的富集	(213)
第四节 湖泊沉积物 POPs 的暴露风险	(216)
一、表层沉积物中有机氯农药暴露风险	(216)
二、湖泊沉积物中 PAHs 暴露风险	(217)
三、湖泊疏浚堆场污泥有机物暴露风险	(218)
参考文献	(224)
第六章 湖泊污染沉积物疏浚与新生表层控制效应	(226)
第一节 污染湖区生态环境背景及沉积物特征	(227)
一、重污染湖区上覆水体水质和生物特征	(227)
二、城郊污染湖区沉积物分布及污染特征	(229)
三、富营养化湖湾沉积物分布及污染特征	(240)
第二节 湖泊疏浚后界面过程对营养物释放影响机理	(244)
一、湖泊疏浚后新生表层活化过程	(244)
二、湖泊疏浚后间隙水和上覆水中物质变化响应	(250)
三、有机质在湖泊新生表层界面活化过程中的作用	(255)
四、湖泊新生表层有机质降解及与界面活化关系	(258)
第三节 湖泊疏浚对富营养湖区沉积物氮、磷污染控制机理	(261)
一、氮、磷污染控制目的的湖泊疏浚模拟	(262)
二、湖泊疏浚对内源氮释放的控制效应	(264)
三、湖泊疏浚对内源磷释放的控制效应	(272)
第四节 湖泊疏浚后新生表层界面环境效应及水质响应	(281)
一、底泥疏浚对封闭湖区水质环境影响	(281)
二、五里湖疏浚对沉积物环境的影响	(285)
三、基于出入湖负荷计算的污染湖泊疏浚效应	(289)
参考文献	(293)
第七章 湖泊水生植物对污染沉积物修复效应	(304)
第一节 沉水植物生长对沉积物界面氮、磷交换的影响	(304)
一、沉水植物种植对沉积物界面影响研究	(305)

二、沉水植物增殖过程及对上覆水营养物含量影响	(310)
三、沉水植物增殖对沉积物间隙水中氮、磷的影响	(313)
四、沉水植物生长对沉积物-水界面氮、磷释放的影响	(315)
五、沉水植物生长对沉积物中形态营养物的影响	(317)
第二节 水生植物生长对疏浚沉积物内源控制影响	(322)
一、沉积物疏浚样制作与植物修复培养	(323)
二、菹草在模拟疏浚沉积物上生长效应	(324)
第三节 实验区水生植被重建对沉积物释放和界面过程的影响	(333)
一、材料与方法	(333)
二、示范区生态重建工程效果及分析	(336)
参考文献	(346)
第八章 湖泊污染沉积物原位修复原理与模式	(349)
第一节 盐类投放对磷污染沉积物控制效应	(350)
一、沉积物-水系统的盐类投加	(350)
二、生石灰投加对水体磷的去除	(351)
三、铝盐投加对水体磷去除	(352)
四、铁盐投加对水体磷的去除	(353)
第二节 物理覆盖对污染沉积物氮、磷释放控制效应	(355)
一、物理覆盖物对沉积物氮释放速率的影响	(356)
二、物理覆盖物对沉积物磷释放速率的影响	(358)
三、内源污染控制的覆盖材料及量的选择	(359)
第三节 湖底曝气对污染沉积物氮、磷释放控制效应	(360)
一、湖底曝气方法及污染沉积物性质	(361)
二、湖底曝气对表层沉积物物理和生物性质的影响	(363)
三、湖底曝气对上覆水和间隙水中氮、磷含量的影响	(364)
四、曝气对沉积物-水界面氮、磷释放通量的影响	(366)
第四节 组合式修复对沉积物污染控制过程及效应	(367)
一、污染沉积物组合式修复的材料与方法	(367)
二、沉积物基质修复对菹草生长的影响	(369)
三、沉水植物基质的适生性修复对水体物理性质影响	(371)
四、沉积物基质的组合性修复对氮、磷释放的控制	(373)
第五节 湖泊沉积物修复效果的概念性模式	(379)
一、单一性修复效果的概念性模式	(379)
二、组合性修复效果的概念性模式	(385)
参考文献	(389)
本书符号对照表	(391)

第一章 入湖水系沉积物中污染物赋存及风险

太湖位于太湖流域中心位置(图 1-1),流域的主体是太湖平原,面积达 27 375 km²,是在以长江为主和钱塘江的合力冲积下形成的(孙顺才、黄漪平,1993)。平原之西及西南为数十至数百米的低山丘陵;北部沿长江为高程 5~7 m(吴淞基面)、相对高亢的平原;南部为杭嘉湖平原,沿杭州湾一带高程为 4~5 m;东侧岗身地带高 4~5 m,向东为平坦的海积平原。平原中部是以太湖、阳澄淀泖湖群为中心的湖荡平原区,高程多在 3~4 m,最低区甚至低于 2 m。整个平原地势低平,河道坡降小,地形由西北向东南倾斜。西部高程在 6~8 m,东部高程在 2~3 m;南北地形沿长江略高,太湖、滬湖和泖湖等略低。91%面积的地面高程低于 5 m,且大致以中部最低洼为主要地形特点,使得平原形成类似浅碟形洼地。另外,海拔高程低、地下水位较高使得位于这些洼地上的湖荡和河流成为蓄积平原和流域来水的主要汇聚体。

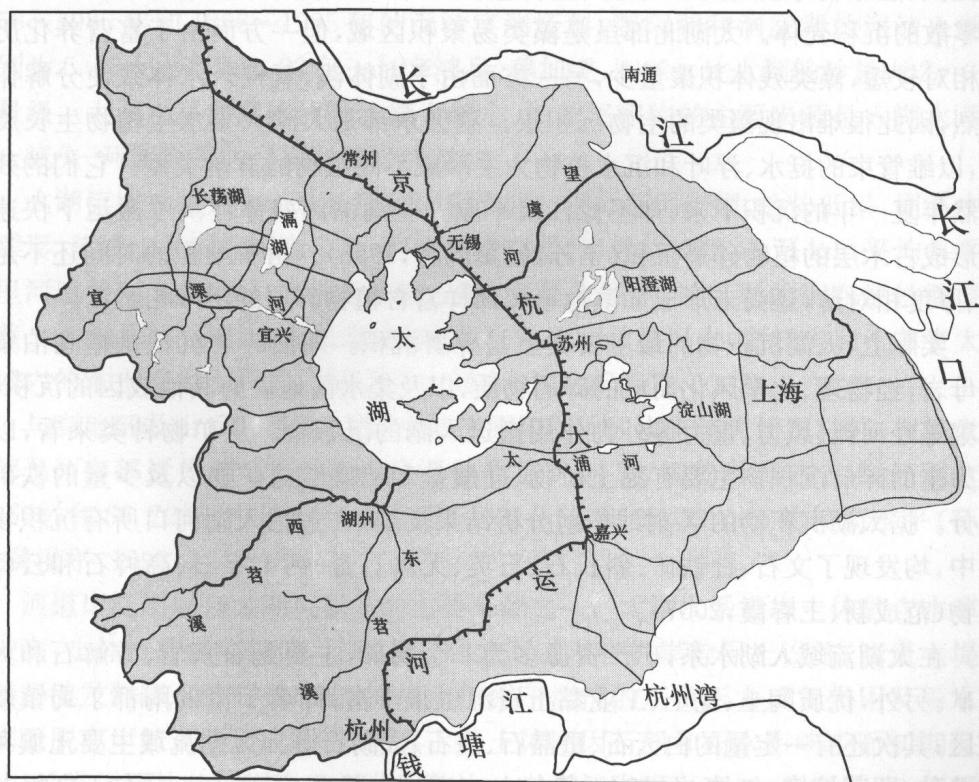


图 1-1 太湖流域水系示意图

太湖水系河道总长度有 12 万多公里,水网面积 2492 km²,湖荡面积 3159 km²,基本集中分布于太湖平原上,水网和湖荡面积分别占平原面积的 10.2% 和 11.5%。太湖水系大致可以太湖为中心划分为入湖水系和出湖水系,入湖水系有太湖以西的苕溪、南溪及洮滂水系等,出湖水系有太湖以东的京杭运河(江南段)、黄浦江水系等。

第一节 湖泊沉积物来源及入湖水系污染

一、沉积物来源及河流悬移质输入

湖泊的沉积物可分为化学沉积、生物沉积和碎屑沉积三种类型,并且不外乎来自水体内部和外部两种途径。在太湖水系,水体由于矿化度较低(约小于 200 mg/L)、常量离子含量不高,属于弱矿化水向中矿化水过渡阶段(黄漪平等,2001);另外,入湖河道较短,因此难以形成由湖泊化学、生物化学和沉积物-水界面地球化学过程产生的内生矿物,以及在特定条件下形成于沉积物中的自生矿物。太湖属高生产力湖泊,生物量相对较高。虽然低矿化水平难以形成介形类等水生甲壳类生物沉积,但螺蛳等腹足类和瓣鳃类生物量较大,在梅梁湾和东太湖等一些区域可形成零散的沉积壳体。太湖北部虽是藻类易聚积区域,但一方面由于富营养化历史还相对较短,藻类残体积聚量少,另一方面由于湖体浅,氧侵入水体致使分解作用强烈,因此很难出现藻类的生物沉积层。湖区东部是太湖大型水生植物生长茂盛区,以维管束的挺水、浮叶和沉水植物为主形成不同植物的群落类型。它们的残体虽然年复一年的沉积下来,却不像江汉平原一些湖泊因残体在洪水搬运下快速埋藏形成古木层的植物碎屑沉积(王苏民、窦鸿身,1998)。由于堆积的时间还不足够长、厚度相对薄,还尚未形成如滇池草海那样富含植物碎屑的沼泽相淤泥。

实际上,太湖沉积物的最主要类型是碎屑沉积。湖泊碎屑沉积是指湖泊集水区母岩,经物理、化学风化而成的碎屑物质,以及集水区地表的其他成因的沉积物、土壤等经河流、风力、重力等外力作用搬运入湖的沉积物。从矿物种类来看,以陆源为主的碎屑沉积物主要有黏土矿物、硅酸盐和铝硅酸盐矿物以及少量的铁矿物成分。据太湖沉积物的 X 射线衍射分析结果反映,在包括入湖河口所有沉积物样品中,均发现了文石、针铁矿、斜长石、石英、无水石膏、钙十字石、高岭石和云母等矿物(范成新、王春霞,2007)。

在太湖流域入湖水系,矿产资源多为非金属矿,主要是石灰岩、方解石和大理石矿;另外,优质陶土、瓷土、工业黏土资源也很丰富,闻名于世的陶都丁蜀镇就在该区;其次还有一定量的白云石、重晶石、磁石、太湖石等。太湖流域主要土壤种类有 7 种,即黄棕壤、红壤、石灰土、紫色土、水稻土、潮土、沼泽土。分布于高程 80 m 以上山丘的为黄棕壤,以落叶植被为主;80 m 以下的山麓为红壤,植被以果园和常绿林为主;高程 10 m 以下的山前平原为黄砂土和小粉土;谷地为马肝土;平原区主

要为白土、黄泥土、乌泥土等。以上这些矿物和土壤均有可能通过水土流失等途径而进入河道乃至湖泊水体。

据 20 世纪 80 年代末调查,太湖环湖主要河道有 140 多条,不同水情下河道的悬浮物(SS)含量具有一定差异(黄漪平,2001)。平水期(1987 年 5 月)环湖河道 SS 含量为 0.0~220.2 mg/L,丰水期(1987 年 7 月)为 3.50~189.0 mg/L,枯水期(1988 年 3 月)为 13.0~645.0 mg/L,全年平均为 81.6 mg/L。在全年入湖的 455 563 t 悬移质中,环湖河道悬移质的直接入湖量就达到 399 614 t,占 87.72%(范成新等,2001),而来自湖面干湿沉降及区间工厂矿山的悬移质不足 13%(表 1-1)。

表 1-1 进入太湖的悬移质总量统计(1987~1988 年)

类 型	直接入湖				间接入湖		合计
	环湖河道	湖面湿沉降	湖面干沉降	小计	区间工矿	折合入湖量	
悬移质数量/t	399 614	23 386	16 249	439 249	26 313	16 314	455 563
比例/%	87.72	5.13	3.57	96.4	5.8	3.58	100.0

与鄱阳湖和洞庭湖的悬移质入湖量相比,太湖的入湖总量要小得多。据 1956~1985 年和 1956~1995 年的泥沙实测资料,鄱阳湖和洞庭湖的泥沙入湖量分别为 5.16 亿 m³ 和 1.22 亿 m³(窦鸿身、姜加虎,2003),比太湖输沙量大 2~3 个数量级。太湖水系向湖体的输沙能力较小,湖体沉积物的主要来源是入湖水系的水土流失、河湖岸带的崩塌和湖岸的侵蚀。

太湖流域地貌分为山地丘陵和冲积平原。平原范围广阔,地势低平,周高中低成碟形,流域水系以太湖为中心,河流纵横交错,河道总长度 12 万 km,平均每平方公里河道长度 3.2 km。西部为山地丘陵,东部为平原,被巨厚的第四纪松散层所覆盖。据相关部门统计,太湖流域水土流失总面积数量巨大,浙江省和江苏省太湖流域内的水土流失面积总量超过了 1400 km²(毛新伟等,2007)。

与高地区及山丘区相比,太湖流域平原河网地区水土流失情况较轻,但在太湖西部及西南部近岸带,沉积物的陆源性质极为明显,细粉砂所占比例分别达到 72.65%和 63.72%,中值粒径也达到 0.031 mm 和 0.023 mm 的较高水平(孙顺才、黄漪平,1993)。

河道岸堤崩塌是太湖沉积物的主要来源之一。太湖水系堤坝土体的含水率一般较高,土体抗剪强度较低,且相当一部分河道没有护岸等保土设施,河道土堤受到船行波及强降水的频繁冲击,河岸土体由于波浪的正负压力反复作用及雨水的冲刷而脱离岸坡逐渐形成凹岸,而其上部土体则因行船和雨水影响小而初期保持原状,后发展至块状坍塌崩于河荡水体中。在浙江省嘉兴市,一些河道 20 年间因崩塌而增宽了近 20 m。如红旗塘等河道,因未建护岸河堤,淘岸冲刷年均均为 15~60 cm,河道的平均淤积深度为 0.5 m,最大淤积深度达 1 m。在江苏省宜兴

市,截至 2003 年底尚有水土流失面积 296.5 km^2 ,其中轻度侵蚀面积 289.5 km^2 、中度侵蚀面积 4.5 km^2 (毛新伟等,2007)。

在外营力与土体的抗蚀力相互作用的过程中,当外营力大于土体抗蚀力时就必然会发生土壤侵蚀。王琛瑞和张金池(2000)应用库塘淤积、输沙模数结合悬推比计算以及侵蚀厚度推算三种方法,对太湖流域西部 1535 km^2 的典型入湖区域进行水土流失研究,认为降水、土壤性状、地质、地貌、植被以及人为活动等是影响太湖流域水土流失的主要因素。太湖流域地处长江三角洲下游,降雨充沛,台风频繁,多年平均降水量为 1177 mm ,其中约 60% 集中在 $5\sim 9$ 月的汛期。 $5\sim 9$ 月虽处于林草植被及农作物生长盛期,对土壤的保护作用较强,但在此期间太湖降水量较为集中,水土流失则相对较重。 $2\sim 4$ 月太湖地区往往出现俗称的“桃花汛”,这一时期的降雨量虽较 $5\sim 9$ 月份少,但由于连雨天为时较长,地表植被正处于萌芽生长阶段,对表层土壤的保护作用较弱,水土流失仍比较严重。人多地少的自然和社会特征,使得太湖流域丘陵山地的开发强度一直处于我国的较高水平,严重的水土流失使得有些地段下切到母质层或下伏基岩。地质因素以及成土母质、岩性对太湖流域水土流失的影响都是间接的,是通过土壤侵蚀来实现的(王琛瑞、张金池,2000)。土壤的孔隙率、胶粒含量和有机质含量等都在一定程度上影响着太湖流域水土流失的发生与发展,如土壤有机质是土壤结构的改良剂,能够在很大程度上提高土壤的抗冲、抗蚀性状。由于太湖流域丘陵山区土壤有机质含量变动系数较大,表现出流域土壤有一定的易流失趋向。

湖体岸带的侵蚀也是太湖沉积物的直接来源。太湖东部和北部的湖岸形态是一种退缩性侵蚀岸带,表现出具缓慢沉降的地貌景观。由于东部湖岸组成物质的变化、湖水动力特性及来沙等条件的差异,各地段的崩塌侵蚀速率也不同。在风浪作用下,迎风湖岸冲蚀、崩塌相对严重并可形成陡壁,在个别陡壁脚底,还可发现向湖面倾斜的侵蚀平台。显然这些被动力淘蚀的岩土岸堤已成为湖体沉积物的直接来源之一。

二、入湖水系的复杂污染环境特征

由于流域的水土流失及河湖堤岸崩塌和侵蚀而形成的太湖沉积物,并非一产生就已具有明显污染特征。对于来自外部途径经长距离携带的碎屑沉积物,除来自陆源水土流失部分可能会夹带程度不同的污染物质外,其他情况下碎屑沉积物中的物质含量大多与土壤背景值相当。因此太湖沿湖河道沉积物在初期没有明显的污染性质,使其真正具有污染特征的主要原因则来自与其一直共存一体的河流污染水体。

太湖流域河网密布,河道率为 3.2 km/km^2 。入湖水系大致可分为山地丘陵区和平原区。山地丘陵区主要在湖西和浙西地区,两地山丘区总面积 7107 km^2 ,地势较高,河床比降大,水流宣泄通畅,对河水污染物的稀释、净化有利。

由于水系拥有多个小流域,每一个小流域有独立的集水区,流域内所有的污染物大多汇集水体。平原区河水则互通,来自不同地区、不同类型污染源的污染物相互混杂,特别是在流经工业和生活排污口以及污染河道的交叉口处,以无机矿物为主的,特别是新生的沉积物将会以物理和化学作用的方式对污染物进行不同强度的吸附及包裹,直至达到沉积物中各类污染物(营养物、重金属、有机物等)与河水中相应污染物的动态平衡。在水动力、溶解氧、pH 和生物作用的影响下,这一以吸附-解析为主导的过程极其复杂,以致有些河道沉积物在被携带进入湖泊之前,其界面或颗粒上的污染物都不能与水体的相应污染物达到真正意义上的平衡。但是,由水土流失、堤岸侵蚀崩塌而来的新生沉积物,必然受到河道水质的影响而呈现污染状态,而造成太湖水系河道水体污染的最主要因素是工业、农业和生活污染的排放。

(一) 典型地区工业向入湖河道的排污影响

工业污染物的排放被认为是太湖地区河道水体遭受污染最主要原因之一。太湖地区是我国最富庶的地区之一,工业发达,人口密集,城市化水平和经济发展水平在国内均处于领先地位,但截止到 2000 年,与污染排放相关的企业仍能在 GDP 中占有较高的生产水平。以宜兴和溧阳两县级市为主的湖西区宜漂河流域为例,2000 年前后,两市产业结构和工业内部结构不断发生了大的变化。溧阳 1990 年三产比重为 36.8 : 43.8 : 19.4,到 2000 年调至 14.8 : 49.7 : 35.4。第二产业的增加反映工业占 GDP 的比重上升,同时每年 14% 左右的增速,更使得工业在该地区的主导地位。太湖西部入湖区普遍存在纺织、化工和轻工食品等传统产业,同时机械、丝绸、建材等产业也日益成为主导。在宜兴市的工业内部调整中,主要形成以有色和黑色金属产品加工、机械电子、非金属采矿、化学工业为主导产业的工业结构体系。调整后的三产结构比重为 9.1 : 57 : 33.9。

流域产业结构调整是经济发展的必然趋势,但由此带来的环境影响却非常大。在宜兴、溧阳两市的工业结构中,化工产业仍具有重要地位,其次食品、纺织、有色金属加工是两市基础产业,这些都是主要产污行业。从两市环保部门的污染源调查中可发现,产业结构与污染物排放密切相关。宜兴市水污染超标企业共 85 家,重点水污染企业 20 家,这 20 家企业的废水排放量占全市废水排放量的 89%;溧阳市重点排放企业有 8 家,占总排放废水的 78.4%,污染多来自化工、纺织、食品、有色金属加工等行业。由于宜兴和溧阳是太湖入湖河道南溪干流(宜漂河)的必经之路,该干流自西向东从两市境内穿过,流经宜兴市后由大浦口注入太湖,因此,工业污水的排放对入湖河道水体的污染是不言而喻的。

具有平原和丘陵地貌类型的溧阳市,其主要工业污染物,也大多沿宜漂河主干河流进行排放,不同行业对水系水体的污染情况在太湖入湖流域更具有代表性。溧阳市工业种类众多,相对齐全,主要为化工、纺织、印染、食品、冶金、电镀等 18 个